

e-Mobility インバータ生産における最新技術の動向*

e-Mobility Latest Technology Trends in Inverter Production

福西 篤志 Atsushi FUKUNISHI
山田 翔大 Shota YAMADA

As part of efforts to address global environmental issues such as global warming and resource and energy depletion, there is a growing need to improve fuel efficiency and promote electrification of automobiles, i.e., Battery Electric Vehicle (BEV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). In e-Mobility, the Power Control Unit (PCU) and the Power Supply Unit (ESU) with charging and power conversion functions are key components of Inverter (INV). In recent years, automakers have accelerated vehicle development, and production technology also needs to follow suit.

Keywords :

e-Mobility parts, mass production of inv, wiring connection, soldering, laser welding of copper, infrared, ring mode, in-process monitoring, reflected light, spatter free, keyhole depth, Optical Coherence Tomography

1. 序論

e-Mobility (電動車両) における基幹部品であるパワーコントロールユニット (PCU) や充電機能と電力変換機能をもつ電力供給ユニット (ESU) など必ず不可欠な直流交流変換 (INV) が内蔵され近年、自動車メーカーの加速的な電動車両展開によりその生産技術も追従する必要性が求められる。インバータ生産ラインは半導体、パワーモジュール、アセンブリ (ASSY) と大きく3つのライン構成となる。バッテリー式電気自動車 (BEV) の拡大に向け車両搭載のバッテリー搭載量が増え PCU 搭載環境も様々である。内部構造にはインダクタンス低減や配線長短縮化など低背化、分離化が主流となっている。イメージを Fig. 1 に示す。現在さらには次世代 ASSY ライン

においては、2015年から生産開始している第4世代ライン当時に対し、自動化率 (自動工程/全工程数) を向上させ 100% を目指すために製品構造の見直し、革新生産技術、および工法の開発が進められている。主な工程は部品組付け、固定締結、塗布、信号配線接続、パワー配線接続、検査、梱包出荷の大きく7つに分類できる。高生産量な自動ラインを構築するには信頼性の高い接続工程にあり信号配線接続は主にはんだ付け工法が用いられ Fig. 2 に示す。パワー配線接続は Fig. 3 に示すネジ締結やアーク溶接に分類される TIG (Tungsten Inert Gas) や最近では高生産性及び速生産性および銅バスバー配線長の短縮化など、回路インダクタンス低減を期待できるレーザ溶接工法の採用が加速しその接合は高品質、高信頼性が要求され、本稿ではこの接続技術の動向を説明する。

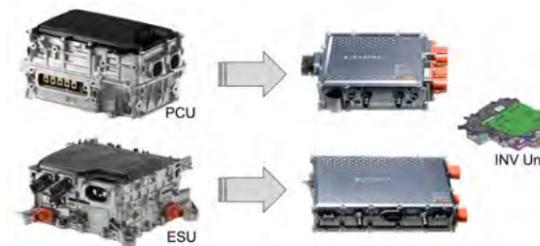


Fig. 1 PCU・ESU and INV-unit images



Fig. 2 Soldering and Press-fit process images



Fig. 3 Wiring connection process images

2. INV 生産工程の概要

2.1 ライン構成と自動化率推移

INV 生産ラインは Fig. 4 に示す。半導体製造からその半導体を実装されたパワーモジュールそして ASSY 工程に繋がる。半導体、およびパワーモジュール工程はその部品の取り扱い特に静電気や異物といった些細な要因にて致命的な故障に繋がるため基本的には人が関与しない全自動工程 (自動化率 100%) となっている。また INV1 台に多くのパワーモジュールが使用されるためその生産能力維持も重要である。最終工程である ASSY ラインは Fig. 5 に示すように様々な部品を組み立て固定、接着、接合され多くの工程を必要とする。このため、自動化率向上させるためには製品設計と生産設備の開発を同時並行で進める SE (Simultaneous Engineering) が重要である。

その自動化率推移も第3世代以前は 50% であったのに対しその展開車両拡大に向けて第4世代では 63%、第5世代では 80% 次世代では 90% と向上している。自動化工程で課題となるのは、種類の多い軟材部品であるハーネスや異形状のカブラ等やコネクタ部品である。人工知能 (AI) 画像処理や多関節ロボットを用いた自動

化を試みるもハイタクトな生産ラインにおいて稼働率を低下させ、人との置き換えにその議論は絶えないのが現状である。



Fig. 4 Automation rate of INV production lines

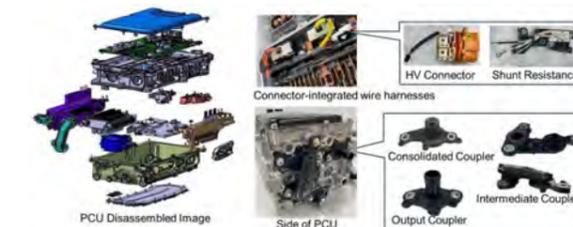


Fig. 5 PCU and INV parts

3. 接合技術の変革

3.1 はんだ付け工法

INV 生産工程における信号配線接続は、主にはんだ付け工法が用いられている。その理由は高信頼、および自動化ラインの構築が容易で高生産性を期待できるためである。しかしながら、はんだ槽内の大量のはんだを 24 時間溶かし続けて使用する噴流式局所リフロー炉は、多くの電力を消費し、はんだ濡れ性を向上させるため、前工程でのフラックス (Flux) 塗布と乾燥工程なども必要となり、近年の脱 CO₂ やカーボンニュートラルなどの取り組みにて、生産工場への採用が厳しい状況である。そこで電力消費の少ない且つ Flux 入り糸はんだを用いたコテ式はんだ付けやレーザ光によるはんだ付け工法などの採用が増えた。ただし量産におけるコテ先などの消耗、Flux 及びはんだボール飛散など品質維持や高生産性に限界が見え、最近では、個別にはんだをノズル内で溶融させ、リード端子と基板スルーホールとを接続させるノズル式はんだ付け工法に置き換わってきた。近年では、従来欧州及び中国などで多く採用されているスルーホールに直接挿入し、電気接続を可能とするプレスフィット端子接合の採用検討も盛んである。Fig. 6 に、そのはんだ付け工法領域を示す。

* JIEP (一般社団法人エレクトロニクス実装学会) の了解を得て MES2023 マイクロエレクトロニクス シンポジウム論文集より一部変更加筆して転載

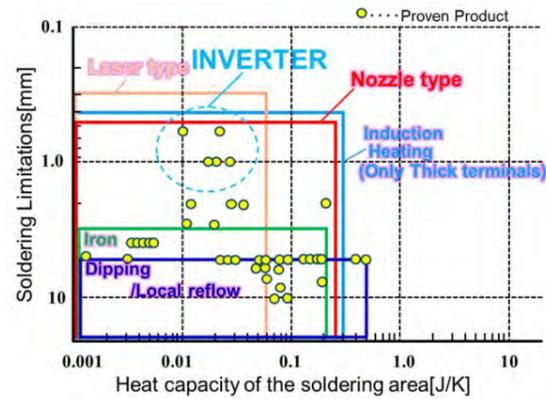


Fig. 6 List of soldering methods for proven products

3.1.1 ノズル式はんだ付け工法

ノズル式はんだ付け工法は、セラミックス材の熱伝達部内部に糸はんだが挿入できる開孔が設けられているのが特徴であり、そのノズルを外部より 430°C から 500°C で加熱することによって回路基板とリード端子をはんだ付けする工法である。その熱伝達プロセスは溶け液体化した糸はんだ内の Flux によってはんだや基板スルーホールやリード端子を温められ、はんだ濡れを確保実現している。つまり、ノズル内の高温雰囲気での液化した Flux の熱耐力が失われると、その熱伝達は機能を著しく失い、濡れ性の悪化を引き起こす。そのプロセスを Fig. 7 に示す。

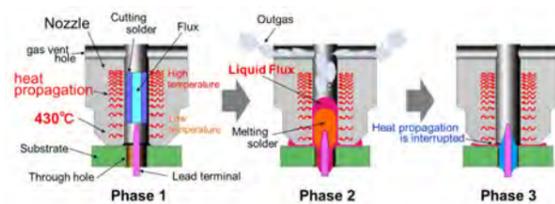


Fig. 7 Nozzle soldering process image

プロセスを可視化するために、ノズルに観察用スリットを加工したノズル内部のはんだ溶融変化の観察結果を Fig. 8 に示す。良好な状態と濡れ不良を引き起こす状態を比較すると、ノズル内部の Flux の挙動に大きな差が見られた。Fig. 9 はそれを簡易的に観察するために、240°C / 360°C に加熱したホットプレート上での糸はんだの溶融挙動を観察したものである。容易に両者の差をその場で観察でき、Fig. 10 に示す TG 測定（熱重量測定）においても、同様の挙動を確認することができた。

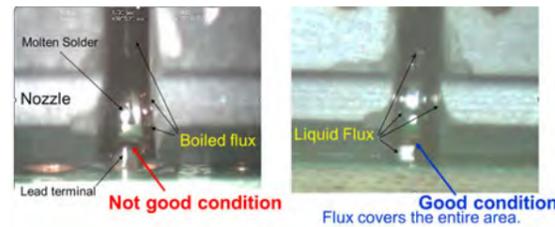


Fig. 8 Comparison of solder behavior inside nozzle

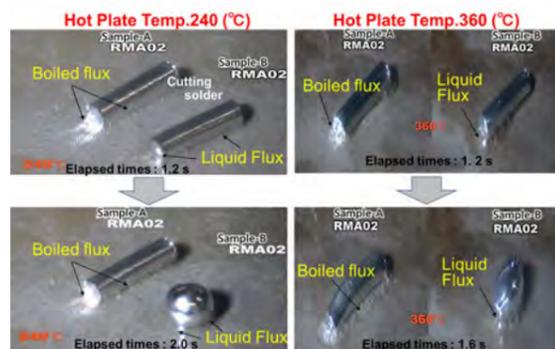


Fig. 9 Behavior of string solder on hot plate

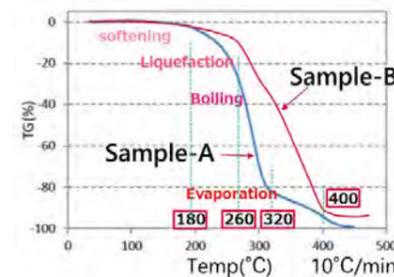


Fig. 10 TG Analysis comparison results

ノズル式はんだ付け工法は、1 個のノズルではんだ付けプロセスが完結しているが、数 10 ピン以上ある信号線のはんだ付けに時間を要する欠点があり、複数台の装置導入が必要となる。Fig. 11 に示すように、ノズルをマルチ化することによって、INV 1 台当たりのはんだ付け時間を短縮し設備投資を低減させた。マルチ化されたノズルは、その構造上ノズル先端に温度勾配が発生するため、ノズル先端部の温度の均一化が多ピン同時はんだ付けの品質の鍵を握る。また、基板へのノズル接触面増大によるデラミネーションやミーズリング、ランドリフト、リセッションなど基板へのダメージも注意しなくてはならないため、ノズル先端に凸部を設けて基板接触面積を最小限とした¹⁾。

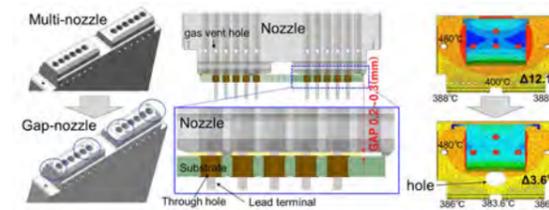


Fig. 11 Multi-nozzle and heat equalization

3.2 レーザ接合技術

3.2.1 インプロセスモニタリング

INV には、パワー半導体モジュールが多く実装され、電力損失低減にパワー配線長の短縮化が重要である。第 4 世代 INV から高生産性・省スペース接合が見込めるリモートレーザ溶接工法を開発し量産適応した。Fig. 12 に、第 5 世代 INV のレーザ溶接部を示す。溶接部は、多いものでは 48 点接合部位があり、レーザ走査数 288 走査を 30 秒以内に完了する。Fig. 13 に溶接の品質保証システムを示す²⁾。

溶接時に発光するプラズマ光より、その 1 本の走査ごとの溶接面積を統計処理推定し、さらに発生するスパッタをカメラで同期検知することで、全溶接走査の接合品質保証している。

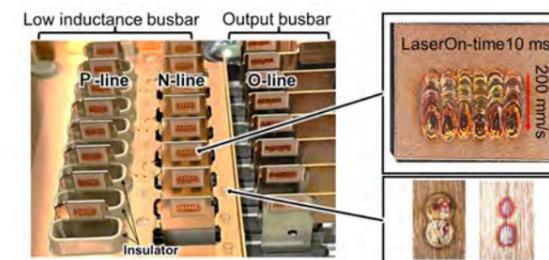


Fig. 12 5th Generation INV busbar laser welding

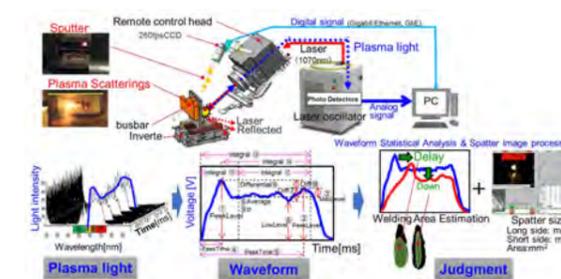


Fig. 13 Plasma & Spatter monitoring system

さらに、近年では計測技術精度向上により眼科医療の用途において普及している光干渉を応用した光干渉断層計測技術（Optical Coherence Tomography：以下

OCT と略す）がある。OCT は、低コヒーレンス光源を使った干渉断層計測であり、白色干渉計として高精度な表面計測装置として産業利用が進んだ。さらに、深度方向の高速性および計測精度を実現し、低コヒーレンス光干渉を参照光路長方向に走査することで、深度方向の情報や高速ラスタ動作にて形状を得ることが可能となった³⁾。これをレーザ溶接用のガルバノスキャナーに OCT 計測用のガルバノスキャナーを追加搭載することにより同軸光路上に、OCT 計測光を配置補正することが可能となり、溶接プロセス中に生成される溶接孔（キーホール）の深さを直接監視することが可能となった。その計測概略を Fig. 14 に示す。

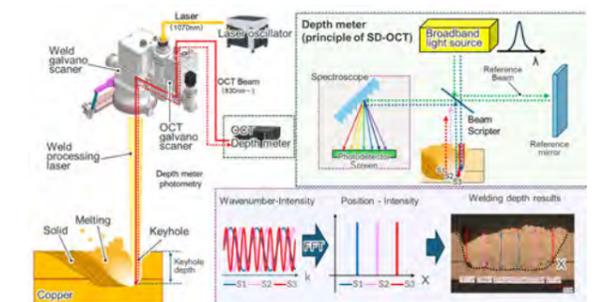


Fig. 14 OCT Measurement System Overview

本技術は、測定用レーザを照射し、加工面からの測定光を分光器スクリーンにより解析し、干渉光信号をフーリエ変換によって位置に変換することで、溶融部の深さを計測する。従来は、溶接時に発生する戻り光や入射光を用いて、溶接品質の判定を行っていたが、この方法は溶接表面の溶融現象の監視に留まり、品質の良否はその代用特性に基づく相対評価にとどまっていた。つまり、溶接品質に直結するキーホールの深さや溶接界面の接合長さを推定することは困難であった。キーホールの深さや溶接界面の長さを確認する場合は、断面カットさらには研磨やカット表面の化学エッチング処理などによる破壊観察をする必要があり、時間と工数を費やす必要があった。それに対して OCT 技術を用いることにより、溶接プロセス中に非接触・非破壊で且つ高精度な計測がほぼリアルタイムで可能となり、溶接走査検討や条件出し時間および製造工程におけるレーザ溶接品質保証レベルの大幅な向上に期待され、採用され始めている。この技術の総称を ICI（Inline Coherent Imaging）と呼ばれている⁴⁾。ICI の量産溶接ライン採用においても

重要な点は、溶接プロセスの安定性であり、不安定な激しい溶接プロセスなどは、ノイズとなって測定され、良否判定が困難な場面もある。また直径 200 μm ~ 350 μm 程度の細かいキーホール開口内部を計測 (ICI 計測集光径 35 μm ~ 45 μm) するにあたってその開口が不安定な場合も計測データ欠落の原因の一つにもなる。つまり加工用 Laser Beam と計測用 Laser Beam との計測タイミング同期性と、スキャナ加工エリア内での同軸位置精度が重要になる。一般的に加工用 IR-Laser Beam の波長 (約 1064 nm) と計測用 ICI Laser Beam の波長 (約 840 nm) の違いによって、加工集光レンズを通過する屈折角差 (色収差誤差) が発生するために、照射角度によってキーホールと計測光の位置にずれが発生する。また、その計測光路長も集光レンズの球面収差で湾曲し変化する。つまり、加工エリア内でのキャリブレーションの精度が重要となる。Fig. 15 に ICI に搭載されているキーホール測定選択と自動補正機能を示す。これらの補正を正確に適用することにより量産での安定した測定が可能となる。高速計測精度を向上させるためには、同軸計測法にて高速処理が可能となり収集できる測定点群データ量が増えデータの信頼性も向上する。Fig. 16 は、その実際のキーホール計測を行ったときの点群データを示す。

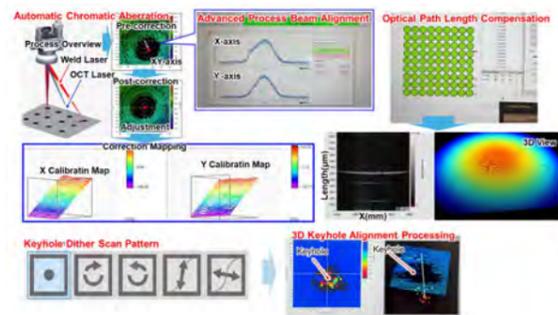


Fig. 15 ICI automatic correction function

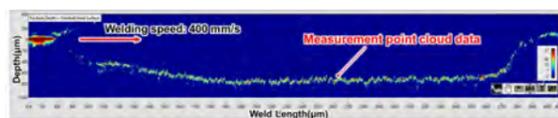


Fig. 16 Keyhole measurement results by ICI

さらに Fig. 17 に示す独自に開発した統合インプロセスモニタリングは、量産ラインにて実際に ICI 技術を用いて、溶接中の溶接界面におけるキーホール深さや溶接

長さ、さらには、従来の戻り光、入射光波形のモニタリング及び溶接中に発生するスパッタ監視などすべてを瞬時に計測でき、溶接品質の判定精度及び溶接プロセス監視が飛躍的に向上した事例を示す。今後の課題としては、重ね溶接以外の継手形状 (拌み、突き合わせ、へり) に対する計測システムの柔軟性向上が重要となる。

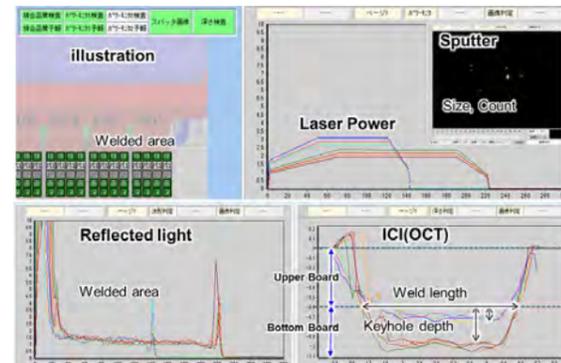


Fig. 17 Integrated in-process monitoring system

3.2.2 銅 (Cu) バスバー溶接の課題と対応

INV のパワー配線バスバーの多くは Cu 材であり、Cu バスバー部品を Fig. 18 に示す。近年、板厚も 0.5 ~ 0.8mm さらに、1 ~ 2mm へと厚銅化が進み従来のボルト締結では部品点数が増え、発熱など課題が多い。

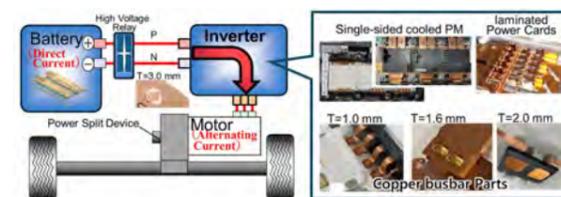


Fig. 18 Copper welded parts in INV

Cu 材への赤外光レーザー (IR-Laser) を用いた溶接は、難しいことで知られている。その理由は、レーザー波長 1064nm に対して Cu は高反射率 (約 96%)、高熱伝導 (約 400W/m・K) である。そのためレーザーの出力を高出力化し、さらにビームスポット径を、200 μm 以下と小スポット化してパワー密度を向上させ、短時間で溶接することが重要となる。その背反は、瞬時に母材に細くて深いキーホールが形成されることにより、スパッタが必ず発生する⁵⁾。その発生を完全に無くすことは困難であり、このスパッタは INV の電気短絡故障につながる原因の一つでもある。近年、Cu

への吸収率の高い短波長の Green-Laser (λ=515nm) や Blue-Laser (λ=445nm) の採用検討も進んでいるが、スパッタを無くすためにスポット径を拡大し、熱伝導型溶接を実施する必要がある。この熱伝導型溶接は Cu への高速溶接や板厚 1.0mm を超える溶接は難しくなる。Fig. 19 に、IR-Laser による INV 量産における各ライン 360 万走査の溶接スパッタ発生率を調査した結果を示す。スパッタ発生を抑制すべく多くのアイデアを織り込み、そのスパッタ発生率は平均で 0.1% を下回っている。

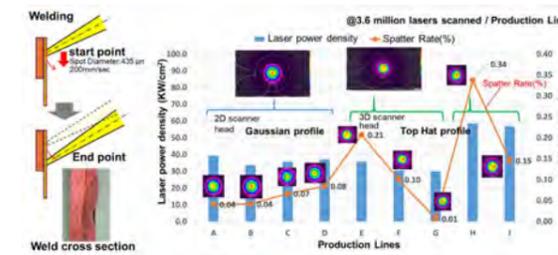


Fig. 19 Spatter generation rate

スパッタ発生が低い分類は、そのビーム形状がガウシアンビームに近いことが解る。これは、マルチモードレーザを約 13 mm のデフォーカス部分で使用し、かつ f-θ レンズを使用する 2D ヘッドによる相互影響が考えられる。今回このビーム形状に近いリングファイバを使用しマルチモードレーザ光の形状を近似再現した。既に多くのレーザメーカーがリングモードファイバを備えた発振器の発売をしているが、重要なのはそのセンターとリングビームの径比率と独立にパワーコントロールが出来るかである。Fig. 20 に各径の比率を変えた実験結果を示す。良好な結果を得られたのは 2 条件であり、この結果をもとに 2 つの最適なリング比率を導き出した。

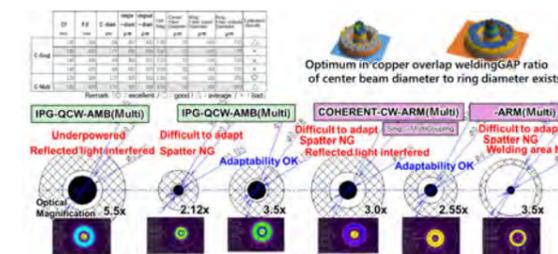


Fig. 20 Optimal ratio of Centerbeam and Ringbeam

さらに、レーザの光モードを変更させる回折光学素子 (Diffractive Optical Element:DOE) を製作し、レーザービームを最適リング形状に模擬させ再現実験を行ったが、結果は同様の効果を得ることができた。近年では、センタービームに IR-Laser バックビームに Blue-Laser を用いた Hybrid-Laser も開発され、それによる最適径での実験を同様にを行い良好な結果が得られた。そのビームプロファイルを Fig. 21 に示す⁶⁾。

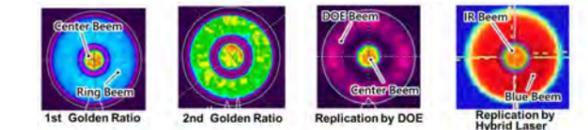


Fig. 21 Beam profiles that reproduce optimal ratios

上記レーザー光によって、困難であった Cu 材へのスパッタフリー溶接を可能とした。Cu 上板 t=1.6mm 下板 t=0.5mm および無電解 NiP めっきの溶接結果をハイスピードカメラにて撮像確認したものを Fig. 22 に示す。

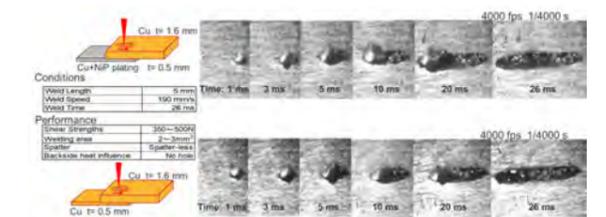


Fig. 22 Camera image of Cu welding by ring-mode laser

現在では Cu 上板 t=3.0mm においても、貫通欠陥無くスパッタフリー溶接を実現が可能である。Fig. 23 には、そのリングモードレーザによつてのスパッタ抑制のプロセスを示したものである。リングモードレーザのキーホール開口部は、安定しやすいため、前項で説明した OCT を用いた ICI 計測に対しても、安定な計測が可能となる相乗効果も確認できた。

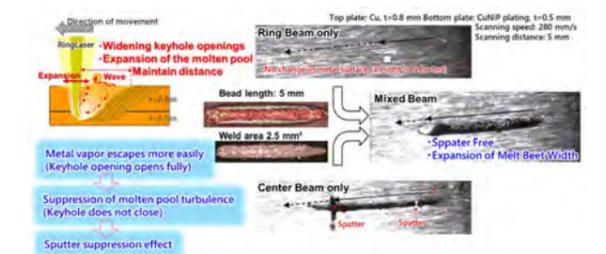


Fig. 23 Effect of ring mode laser

Fig. 24には、Blue-LaserとIR-LaserのHybrid-Laserにて適正なビーム比率を使用したCu材同士の重ね合わせ溶接の実験を行った結果を示す。上下の板厚はそれぞれ $t=2.0\text{mm}/t=0.5\text{mm}$ 、 $t=3.0\text{mm}/t=2.0\text{mm}$ 、 $t=4.0\text{mm}/t=2.0\text{mm}$ 、 $t=5.0\text{mm}/t=2.0\text{mm}$ においても、貫通欠陥無くスパッタフリー溶接を実現出来ていることが確認できた。

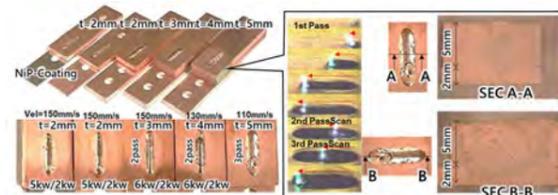


Fig. 24 Experiments in Hybrid-laser welding

Hybrid-Laserは、そのビーム構成がRing-Mode Laserと異なる点に注意が必要で、Ring-Mode LaserはCenter BeamとRing Beamの照射領域が独立に対しHybrid-Laserは、Blue-LaserとIR-Laserが重畳しているため、スポットインスポットの溶接となり、Cuに対して吸収率の高いBlue-Laserの出力を微調整した場合、Center BeamのCuに対する吸収率や加工性が大きく変化する。このためRing-Mode Laserに比べて、溶接開始点でのスパッタ抑制のコントロールが若干難しい場面が発生する場合がある。しかし、Multi-Mode LaserにおいてHybrid-LaserはCuに対する深い溶接は容易に可能である。IR Ring-Mode Laserにて、Center BeamをTEM00 (Transverse Electromagnetic Mode 00) 相当のSingle-Mode Laserを使用することで、深い溶接を容易に実現することが可能であり、用途に応じて適材適所でレーザーを選定することが重要である。

3.2.3 環境配慮したレーザー発振器の開発と導入

2015年から、INVの溶接工程にレーザー溶接を用いて生産を開始してきたが、発振器のメンテナンス性や耐久性などを考慮して光伝送効率の良いファイバレーザーを選定してきた。この理由として、一般的にレーザーは、レーザーマーカなどで良く知られるPulse laserと、連続的に照射できるCW laser (CW: Continuous Wave)がある。後者は一般的に発振器の冷却用に大型チラーや、200V/400V変圧器などが必要で、発

振器も大型となり、その設置スペースや消費電力も問題視されることが多い。Pulse laserとCW laserの両方の特徴を備えた疑似連続発振が照射可能な発振器が、QCW Fiber Laser (QCW: Quasi Continuous Wave)である。その特徴は、Pulse LaserとCW Laserの中間的存在であり、CW Laserのように高出力で長時間レーザーを出し続けることはできないが、600W程度の定格出力範囲では長時間照射は可能であるのに対し、Pulseモードでは50 μs から50msの比較的長いパルスを繰り返し発振させることが可能である。そのレーザーの最大ピーク出力は定格出力の約10倍 (定格600Wの場合は6000W)にも及び、数十ジュールのエネルギーの発生が可能となる。さらに低い定格出力により水冷を必要とせず空冷システムで成立ができ、熱影響をコントロールしやすい材料に与える熱を抑えつつ、CWレーザーよりも高いエネルギー密度で加工できるメリットがあり、高いピーク出力は銅やアルミなどの高反射材金属材料への用途に優れた選択肢と考えられる⁷⁾。

特に、その設置面積や工場電力使用量の低減、更には投資削減効果にも貢献できる。Fig. 25, Fig. 26にその効果を示す。2022年以降、このQCW Fiber Laserの開発を加速させ、まずはRing Mode化に成功した。2023年には、その最大ピーク出力は空冷で12kWにも達し、最大120Jのエネルギーコントロールを可能とした。また品質モニタリングを容易にするために、ファイバー結合部であるコンバイナ部より汎用ファイバーSMA905を接続し、そのファイバー端に、ユーザが自由にバンドパスフィルター・ノッチフィルター・干渉フィルターなどの波長抽出ユニットや、光センサーであるフォトディテクタを取り付けることを可能とし、戻り光モニタリングシステム構築を容易化することに成功した。

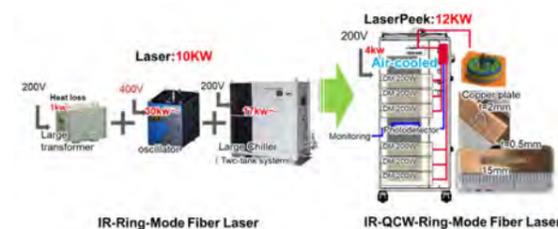


Fig. 25 IR-QCW-Ring-Mode Fiber Laser System

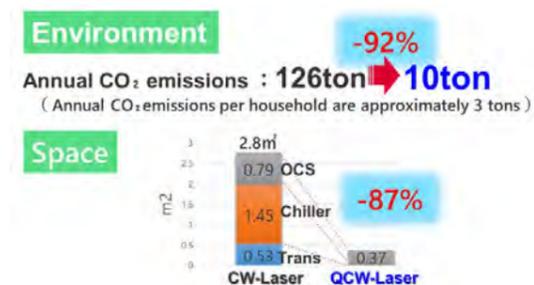


Fig. 26 Environmental contribution of QCW fiber laser

4. 結論

本研究では、ノズル式はんだ付け工法や新たに開発したIR-QCW-Ring-Mode Fiber Laser Systemを使用して、Cu材へのレーザー接合における課題を実験結果により解決した。また、ICI技術を従来のインラインプロセスモニタリングに織り込むことにより、レーザー溶接工法の検討評価工数短縮や、量産における溶接品質保証のレベルアップを達成した。今後、電動化社会は激戦を迎え、高性能・高信頼のより良いパワーモジュール開発、それをアッセンブルするより良いモノづくり技術革新が勝ち抜くための鍵となる。それらを達成するためには必ず接合技術の進化が問われる。

著者



福西 篤志
ふくにし あつし

エレフィシスモノづくり開発部
車載用ユニット部品の工法開発に従事



山田 翔大
やまだ しょうた

エレフィシスモノづくり開発部
車載用ユニット部品の工法開発に従事

5. 謝辞

本研究実験には、装置及び材料会社、レーザー会社と共同で実施したものであり、本開発にご尽力協力いただいたすべての方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中真一郎, 福西 篤志: 公開特許公報 (A) 半田付け装置, および半田付け方法, 特開 2022-117243 (P2022-117243A), 日本国特許庁 (JP), 2022
- 2) 中島 佐知子, 落合 大, 福西 篤志: 統計的手法を用いたリモートレーザー溶接のインライン品質保証技術の開発, 日本自動車技術会論文集 Vol. 47, No. 2, (2016), 621-625
- 3) 椎名 達雄: Optical coherence tomography の展開, レーザセンシング学会誌, 第2巻, 第2号 (2021), 45-52
- 4) 住森 大地: ICI技術によるインプロセスモニタリングツールの開発, レーザ加工雑誌, Vol28, No.2 (2021), 23-28
- 5) 菊地 淳史: "Transition of Industrial High Power Fiber Laser in IPG" レーザ加工学会誌 Vol. 26, No. 3, pp.133, 2019
- 6) M.Kaneko, N.Matsumoto, S.Takashi: "Features of Blue-IR Hybrid Laser and Copper Processing Technique - High Quality Copper Welding by using Blue-IR Hybrid Laser -" 古河電工時報第 Vol.140, pp.23, 2021
- 7) IPG Photonics japan ホームページ: QCW ファイバーレーザー <https://www.ipgphotonics.com/ja/products/lasers/quasi-cw-fiber-lasers>